



**Makale / Research Paper**

**Farklı Tane Boyutuna Sahip Afşin-Elbistan Uçucu Külünün  
Geopolimer Hammaddesi Olarak Kullanımı**

**Ahmet Hayrullah SEVİNÇ**

<sup>1</sup>Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan MYO, İnşaat Teknolojisi Bölümü. Kahramanmaraş/TÜRKİYE,  
[ahmethayrullah.sevinc@istiklal.edu.tr](mailto:ahmethayrullah.sevinc@istiklal.edu.tr)

**Received/Geliş:** 30.01.2021

**Accepted/Kabul:** 04.03.2021

**Öz:** İki farklı tane boyutuna sahip yüksek oranda kalsiyum oksit içeren Afşin-Elbistan uçucu külünün geopolimer harç üretiminde hammadde olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu harç karışımlarının tasarımında aktivatör/bağlayıcı oranı 0,55 ilave su/bağlayıcı oranı 0,50 ve kum/bağlayıcı oranı 3 olarak sabit tutulmuştur. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) beraber kullanılmıştır. SS/SH oranı 1 ve 1,5, sodyum hidroksitin molaritesi 10 ve 14 M ve kür sıcaklığı ise 24 saat boyunca 60 °C ve 90 °C sıcaklık seçilmiştir. Bu numunelerin yayılma, taze ve sertleşmiş birim ağırlık, ultrasonik ses geçiş hızı ve basınç dayanımı özellikleri incelenmiştir. Ayrıca mikroyapıda meydana gelen değişiklikler, termogravimetrik analizi (TGA) ve X-ışını kırınım analizi (XRD) ile araştırılmıştır. En yüksek basınç dayanımı 14GF0,55/1,5-90 (14M SH, öğütülmüş uçucu kül, aktivatör/bağlayıcı oranı 0,55, SS/SH oranı 1,5 ve 90 °C kür sıcaklığı) kodlu numunede 10,30 MPa olarak elde edilmiştir. Molaritenin 10'dan 14'e ve SS/SH'nin 1'den 1,5'e yükselmesi, geopolimerizasyon reaksiyonlarındaki artıştan dolayı mekanik özellikleri de artmıştır. Ayrıca daha yoğun yapı nedeniyle ultrasonik ses geçiş hızı sonuçları da artmıştır. Bu sonuçlar aynı zamanda XRD ve TGA analizleri ile desteklenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Afşin-Elbistan uçucu külü, geopolimer harç, ultrasonik ses hızı, basınç dayanımı, XRD

**Usage of Afşin-Elbistan Fly Ash with Different Particle Size as  
Geopolymer Raw Material**

**Abstract:** It is aimed to utilize Afşin-Elbistan fly ash, contains high calcium oxide in two different particle sizes as a raw material in geopolymer mortar production. In the design of these mortar mixes, the activator/binder ratio was kept constant as 0.55 and water/binder ratio 0.50 and sand/binder ratio 3. Sodium silicate (SS) and sodium hydroxide (SH) were used together as alkaline activators. SS/SH ratio is 1 and 1.5, the molarity of sodium hydroxide is 10 and 14 M, and the curing temperature is 60 °C and 90 °C for 24 hours. Flow diameter, fresh and hardened unit weight, ultrasonic pulse velocity and compressive strength properties of these samples were investigated. In addition, changes in the microstructure were investigated by thermogravimetric analysis (TGA) and X-ray diffraction analysis (XRD). The highest compressive strength was obtained as 10.30 MPa in the sample code 14GF0.55 / 1.5-90 (14M SH, ground fly ash, activator / binder ratio 0.55, SS/SH ratio 1.5 and 90 °C curing temperature). The mechanical properties have also increased due to the increase in the molarity from 10 to 14 and the SS / SH from 1 to 1.5 due to increase in geopolymerization reactions. Also, the ultrasonic pulse velocity results have increased due to the denser structure. These results are also supported by XRD and TGA analysis.

**Keywords:** Afşin-Elbistan fly ash, geopolymer mortar, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, XRD

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Sevinc, A. H., "Farklı Tane Boyutuna Sahip Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Geopolimer Hammaddesi Olarak Kullanımı" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8 (2); 751-765.

*How to cite this article*

Sevinc, A. H., "Usage of Afşin-Elbistan Fly Ash with Different Grain Size as Geopolymer Raw Material" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8 (2); 751-765.

ORCID ID: 0000-0003-3338-8366

## 1. Giriş

Beton; binalar, barajlar, yollar, köprüler gibi pek çok alanda dünyada en çok üretilen ve kullanılan yapı malzemesidir. Betonun temel bileşeni ise çimentodur [1-4]. Portland çimentosunun üretimi için yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulmakta ve bunun sonucunda atmosfere büyük miktarda sera gazı salınmaktadır. Dünyada yıllık üretilen sera gazının yaklaşık %7'si çimento üretiminden kaynaklanmaktadır [1,5,6]. Doğa için zararlı olan bu salınımı azaltmak için çimento yerine çevre dostu alternatif malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır [5]. Bu amaçla son zamanlarda birçok bilimsel çalışmalar yapılmakta ve bunun sonucunda çimento içermeyen bağlayıcılar geliştirilmiştir [7,8]. Bu tip malzemeler, alkali aktifleştirilmiş beton ya da geopolimer beton olarak adlandırılmaktadır [9]. Kovalent bağlarla çevrili mineral moleküller zincirler veya ağlar (geopolimer) potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) gibi alkali çözeltilerle yüksek sıcaklık yardımıyla aktive edilen  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  açısından zengin inorganik bir malzeme olan alüminosilikat malzemelerden üretilmektedir [10]. Yüksek alkali çözeltilerde  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeren malzemeler hızlı bir şekilde çözülmesiyle serbest halde bulunan  $\text{SiO}_4$  ve  $\text{AlO}_4$  tetrahedral yapılarını meydana getirirler, reaksiyonun ilerlemesi halinde bu tetrahedral yapıları oksijen atomları ile bağlanması sonucunda polimerik Si-O-Al bağı oluşturur. Geopolimer malzemelerdeki bu tepkime polikondansasyon neticesinde gerçekleşmekte ve geopolimerizasyon olarak adlandırılmaktadır [11]. Silisyum açısından zengin malzemeler (uçucu kül, cüruf ve pirinç kabuğu) ve alüminyum açısından zengin malzemeler (Kaolin, bentonit gibi killeri) dahil olmak üzere geopolimerizasyon için çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bulunabilirliği nedeniyle, uçucu kül önemli geopolimer kaynakları arasında kabul edilmektedir [10-12]. Uçucu kül kömür kökenli çalışan termik santrallerin yanma sonucu oluşan atık bir üründür. Yüksek  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve düşük CaO içeren uçucu küller betona birçok olumlu özellik kazandırması sebebi ile çimento yerine de yaygın olarak kullanılmaktadır [13-15].

Afşin-Elbistan termik santrali 2795 MW kurulu güce sahip ve ülkemizde en çok uçucu kül üreten santral konumundadır [16]. Bu termik santralinden yıllık yaklaşık olarak 3 milyon tondan daha fazla uçucu kül ortaya çıkmaktadır [17]. Afşin-Elbistan uçucu külü yüksek oranda serbest kalsiyum oksit içermekte ve  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oranı toplamı diğer uçucu küllerden daha düşük çıkmaktadır [18]. Kimyasal bileşimi sebebi ile betonda kullanılması için gereken ASTM C 618 [19], EN 197-1 [20] ve EN 450-1 [21] standartlarına uymamaktadır. Deneysel çalışmalar, çimento harçlarında Afşin-Elbistan uçucu kül oranının artmasıyla basınç dayanımının olumsuz etkilendiğini ve su miktarında artış olduğunu göstermiştir [18]. Uçucu küller en çok çimento endüstrisinde değerlendirilmesine rağmen, çevre için ciddi tehlike oluşturan Afşin-Elbistan uçucu külü bu sektörde değerlendirilememektedir [17].

Afşin-Elbistan uçucu külü literatürde öncelikle beton ve çimento katkısı olarak değerlendirilmeye alınmış ancak bu külün kullanım oranı %10-20 oranında sınırlı kalmıştır [22,23]. Atış vd. yapmış oldukları çalışmada çimento yerine farklı oranlarda Afşin-Elbistan uçucu külü kullanmış ve aktifleştirici susuz sodyum sülfat ile üretilen harç numunelerinin mekanik özelliklerini incelenmişler. Çimento ile kullanımında bu külün %20 oranına kadar kullanılabileceğini ve en iyi sonuçları %10 oranında Afşin-Elbistan uçucu külü kullanımıyla elde etmişlerdir [24].

Yapılan bir çalışmada, Sugözü ve Afşin-Elbistan uçucu külleri, soda sanayi atığı, CEM V/A kompoze çimento ve sodyum silikat kullanılarak hibrit geopolimer beton üretilmiştir. Bu hibrit numuneleri 1 gün boyunca 70 °C sıcaklık kürü ile elde etmişlerdir. Afşin-Elbistan uçucu külü katkılı numunelerde basınç dayanımlarının düştüğü belirtilmiştir [25]. Sevinç ve Durgun'un yapmış oldukları çalışmada Afşin-Elbistan uçucu külü yerine %5, 15, 20, 25 ve %50 oranlarında silis dumanı ve cam tozu kullanımının geopolimer betonda fiziksel ve mekanik etkilerini incelemişler. Alkali çözelti olarak sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) çözeltisini (10M, 12M ve 14M) farklı oranlarda beraber kullanılmıştır. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,45, 0,55 ve 0,65 kullanılmış ve

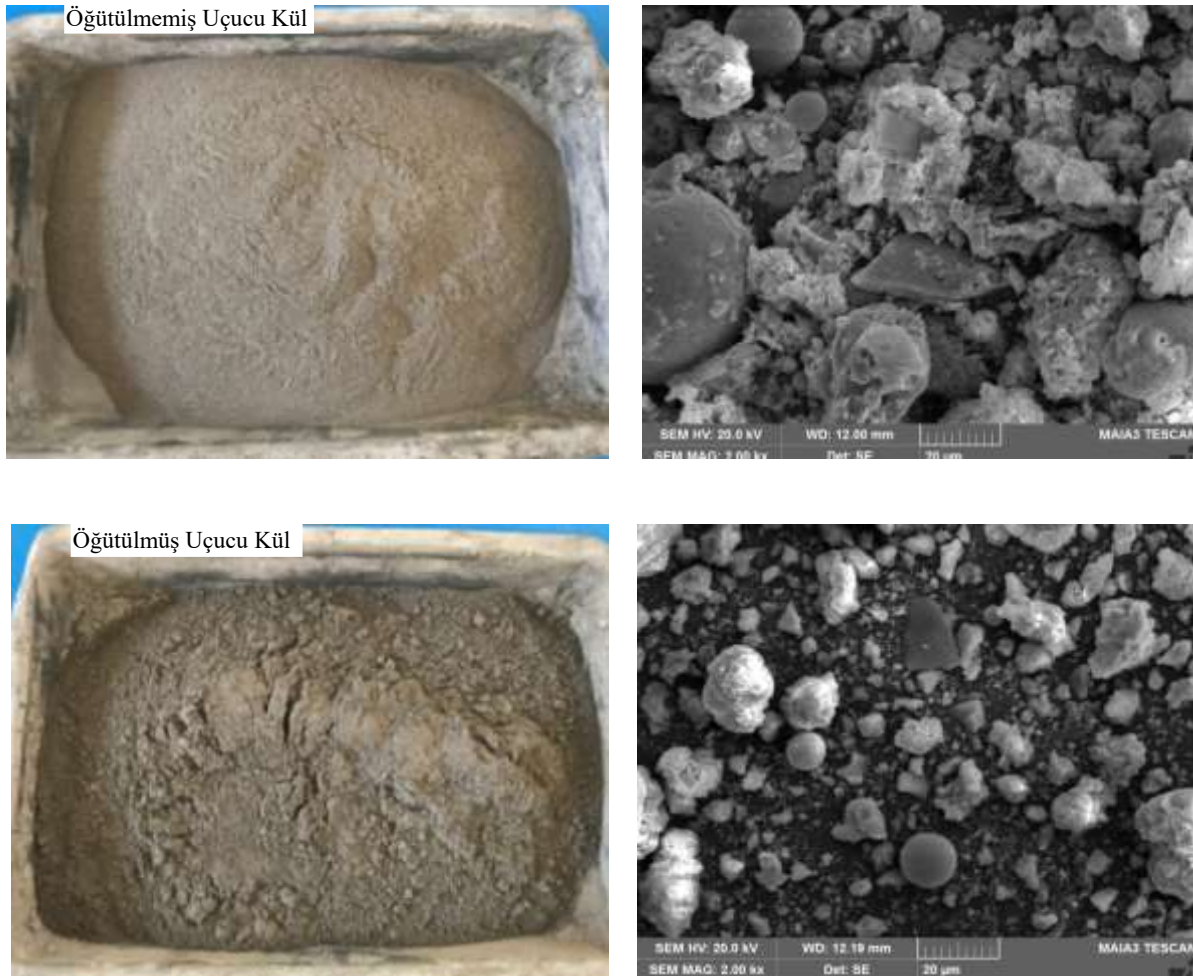
geopolimer numunesi üretimi için 1 gün boyunca 85 °C kür ile gerçekleştirilmiştir. Elde ettikleri çalışma sonucunda; silis dumanı kullanımının %15 oranına kadar kullanımı basınç dayanımını artırırken daha yüksek oranlarda kullanımında dayanım değerleri düşmekte ve cam tozunda bu oran %25 artmaktadır. Molarite ve aktivatör/bağlayıcı oranı arttıkça dayanımın arttığı ifade edilmiştir [26].

Bu çalışmada, iki farklı tane boyutuna sahip Afşin-Elbistan uçucu külünün geopolimer hammaddesi olarak kullanımı araştırılmıştır. Geopolimer harç numuneler üretilirken 60 °C ve 90 °C olmak üzere iki farklı kür sıcaklığı, 1 ve 1,5 olmak üzere iki farklı SS/SH oranı ve 10M ve 14M olmak üzere iki farklı SH molaritesi seçilmiştir. Aktivatör/bağlayıcı oranı tüm örneklerde 0,55 olarak sabit tutulmuştur. Bu numuneler üzerinde 7 ve 28 günlük birim hacim ağırlığı, ultrasonik ses hızı, basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Ayrıca taze özelliklerini belirlemek için yayılma testi ve içyapı özellikleri belirlemek için TGA ve XRD analizleri yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Çalışmada Afşin-Elbistan Termik santralinden elde edilen kül kullanılmıştır. İki farklı uçucu kül hammadde resimleri ve SEM taramaları Şekil 1’de ve uçucu külün kimyasal analizi Tablo 1’de verilmiştir.

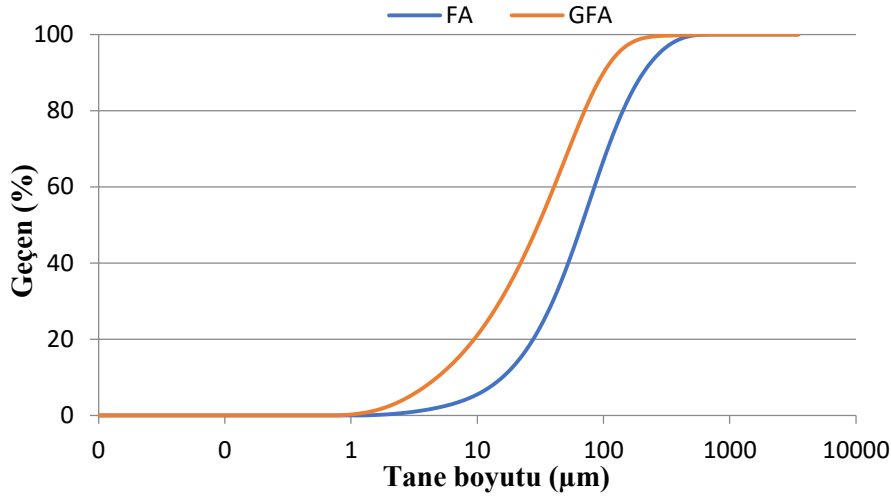


Şekil 1. Öğütülmüş ve öğütülmemiş uçucu külün resimleri ve SEM taramaları

Öğütülmemiş uçucu külün (FA) özgül ağırlığı 2,42 ve öğütülmüş uçucu külün (GFA) özgül ağırlığı 2,54'tür. FA'nın tane boyutu analizinde  $D_{90}=207 \mu\text{m}$  iken GFA'nın tane boyutu analizinde  $D_{90}=100 \mu\text{m}$  çıkmış ve iki farklı külün tane boyut analizi Şekil 2'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Afşin-Elbistan uçucu külünün kimyasal analizi

Bileşenler	Oranlar (%)
SiO <sub>2</sub>	23,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,54
<b>SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>37,21</b>
CaO	43,46
SO <sub>3</sub>	9,12
MgO	1,87
Na <sub>2</sub> O	1,46
K <sub>2</sub> O	0,35
Kızdırma Kaybı	3,88



**Şekil 2.** Öğütülmüş ve öğütülmemiş uçucu külün tane boyut analizi

Agrega olarak 0-4 mm boyutunda kırma kum kullanılmıştır. Kullanılan kumun elek analizi ve fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Kumun özellikleri

Elek açıklığı (mm)	Elekten geçen (%)
4	100
2	67
1	34,6
0,5	22,5
0,25	7,6
0,075	1,2
Pan	0
Özgül ağırlık	2,69
Su emme (%)	1,76

Geopolimer harçlarda aktivatör olarak Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH çözeltileri kullanıldı. SS'nin görünüşü berrak sıvıdır ve kaynağı alkali kumdur. SS'nin Na<sub>2</sub>O miktarı %10,94 ve SiO<sub>2</sub> miktarı %22,56'dır. SS'nin moleküler modülü 1,94 ve bome derecesi (Bé°) 38'dir. SH olarak %97 yüksek saflıkta olan

pellet NaOH kullanılmıştır. Şehir şebekesinden alınan musluk suyu harç karışımlarında kullanılmış ve karışım suyu TS EN 1008 standardına uygunluğu test edilmiştir [27].

## 2.2. Metot

Geopolimer harç numunelerin üretiminde su/bağlayıcı oranı 0,5, kum/bağlayıcı oranı 3 ve aktivatör/bağlayıcı 0,55 olarak sabit tutulmuştur. Karışımlarda 1 ve 1,5 SS/SH oranı, 10M ve 14M SH molaritesi, 24 saat 60 °C ve 90 °C kür sıcaklığı gibi farklı parametreler belirlenmiştir. Geopolimer harç numunelerin karışım oranları ve taze halde yayılma değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Toplam 16 farklı geopolimer harç karışımları üretilmiştir. Numunelerin molaritesi, hammaddenin öğütülmüş veya öğütülmemiş olması, aktivatör/bağlayıcı oranı, SS/SH oranı ve kür sıcaklığı sıralamasına göre isimlendirilmiştir. Örneğin, 10GF0,55/1-90 numunenin 10M SH oranı, öğütülmüş uçucu kül, aktivatör/bağlayıcı oranı 0,55, SS/SH oranı 1 ve kür sıcaklığının 90 °C olduğunu göstermektedir.

**Tablo 3.** Harç numunelerin karışım oranları

Numune Adı	Kum (g)	Uçucu Kül (g)	SS (g)	SH (g)	Su (g)	Yayılma (cm)
10F0,55/1-60	1350	450	123,75	123,75	286	17,0
10F0,55/1,5-60	1350	450	148,50	99,00	280	17,5
14F0,55/1-60	1350	450	123,75	123,75	283	16,5
14F0,55/1,5-60	1350	450	148,50	99,00	277	17,5
10GF0,55/1-60	1350	450	123,75	123,75	282	17,0
10GF0,55/1,5-60	1350	450	148,50	99,00	278	16,5
14GF0,55/1-60	1350	450	123,75	123,75	276	16,5
14GF0,55/1,5-60	1350	450	148,50	99,00	273	17,0
10F0,55/1-90	1350	450	123,75	123,75	286	17,0
10F0,55/1,5-90	1350	450	148,50	99,00	280	17,5
14F0,55/1-90	1350	450	123,75	123,75	283	16,5
14F0,55/1,5-90	1350	450	148,50	99,00	277	17,5
10GF0,55/1-90	1350	450	123,75	123,75	282	17,0
10GF0,55/1,5-90	1350	450	148,50	99,00	278	16,5
14GF0,55/1-90	1350	450	123,75	123,75	276	16,5
14GF0,55/1,5-90	1350	450	148,50	99,00	273	17,0

SH çözültisi, 10 M veya 14 M konsantrasyona göre harç karışım üretimi işleminden 48 saat önce hazırlanmıştır. Kullanılacak aktivatör oranı, aktivatör/bağlayıcı oranına göre toplam bağlayıcı miktarı üzerinden ağırlık olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan aktivatör miktarı, istenen SS/SH oranına göre belirlenmiştir. Karıştırma işleminden 24 saat önce SS ve SH karıştırılmıştır [28]. Kum ve uçucu kül gibi katı bileşenler için homojenliği sağlamak amacı ile 180 saniye boyunca laboratuvar tipi karıştırıcı ile kuru olarak karıştırılmış ve ardından SS-SH karışımı miksera ilave edilmiş ve 240 saniye karıştırılmıştır.



**Şekil 3.** (a) Yayılma testinden bir görüntü (b) GFA numuneleri (c) FA numuneleri

İşlenebilirliğin iyileştirilmesi ve hızlı priz almasının önlenmesi için ilave su kullanılmış ve 120 saniye daha karıştırılmıştır. Karıştırma süresinin ardından numuneler  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$  boyutunda kalıplara dökülmüştür. Son aşama olarak 24 saat boyunca  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  veya  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  derece kür sıcaklığı uygulanmıştır. Üretilen numuneler test süresi gelene kadar oda koşullarında tutulmuştur. Numunelerin sıcaklık kür işleminin ardından görüntüsü ve yayılma testinden görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir.

Geopolimer harç numunelerin birim hacim ağırlığı bulunmuştur. Ultrasonik ses hızı ve basınç dayanım testi için ASTM C 597-16 ve TS EN 12390-3 standartları uygulanmıştır [29, 30]. X-ışını kırınımı (XRD) analizi, Rigaku marka cihaz kullanılarak yapılmıştır. TGA analizinde Perkin Elmer marka TGA-DTA cihazı, azot gazı kullanılmış ve  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{dk}$ 'lık ısıtma hızı ile oda sıcaklığından  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkarılarak yapılmıştır. Ultrasonik ses hızı Pundit cihazı ile yapılmış ve deney anından bir görüntü Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Ultrasonik ses hızı testinden bir görüntü

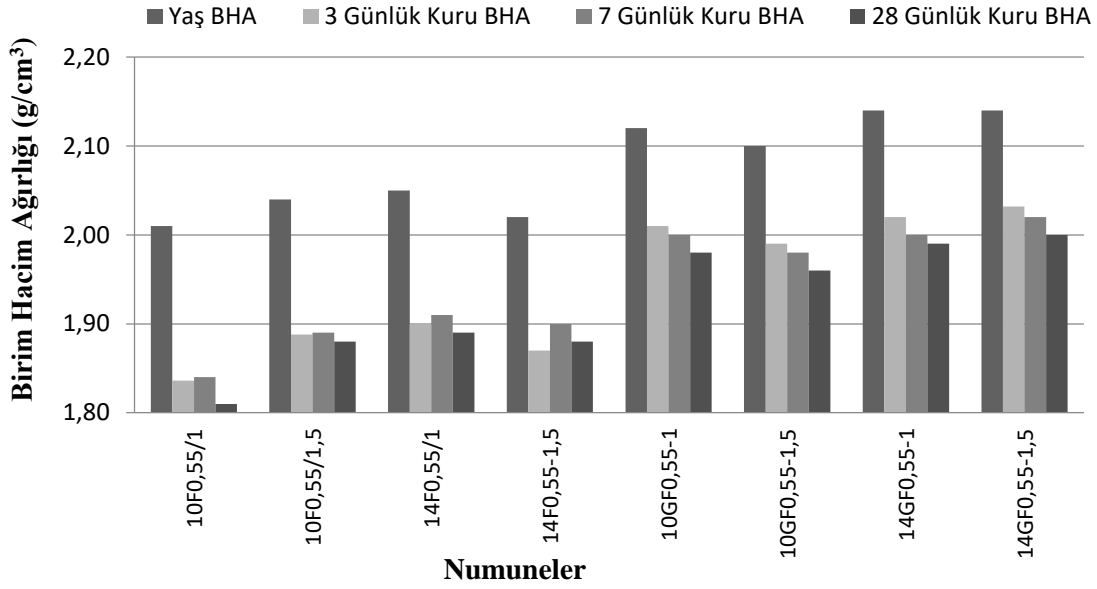
### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Birim hacim ağırlıkları (BHA)

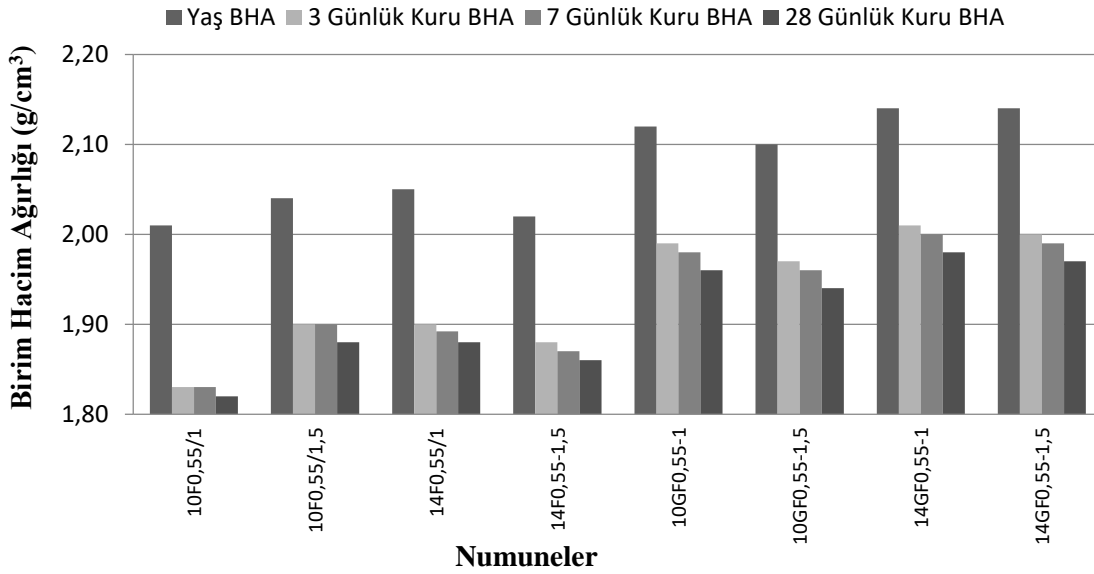
Geopolimer numunelerin taze ve sertleşmiş birim ağırlık sonuçları Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.

Geopolimer harç numunelerinin taze birim hacim ağırlığı sonuçları  $2,01-2,14 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmekte, en yüksek taze birim hacim ağırlığı 14GF0,55-1,5 numunesi verirken en düşük taze birim hacim ağırlığı 10F0,55-1 numunesi vermiştir. Öğütülmüş uçucu kül katkılı geopolimer harç numuneleri öğütülmemiş uçucu kül numunelere oranla daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. 28 günlük  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kürlenmiş numunelerin kuru birim hacim ağırlığı sonuçları  $1,82-1,98 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmekte, en yüksek sertleşmiş birim hacim ağırlığı 14GF0,55-1 numunesi verirken en düşük sertleşmiş birim hacim ağırlığı 10F0,55-1 numunesi vermiştir. 28 günlük  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de kürlenmiş numunelerin sertleşmiş birim hacim ağırlığı sonuçları  $1,81-2,00 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmekte, en yüksek sertleşmiş birim hacim ağırlığı 14GF0,55-1,5 numunesi verirken en düşük sertleşmiş birim hacim ağırlığı 10F0,55-1 numunesi vermiştir. Kaya'nın yapmış olduğu çalışmada geopolimer harç numunelerin birim hacim ağırlıkları  $1,88-1,98 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmektedir [31]. Başka bir

çalışmada 85 °C’de kürlenene Afşin-Elbistan uçucu külü içeren geopolimer beton numunelerin (10, 12 ve 14M) birim ağırlığı 1,98-2,09 g/cm<sup>3</sup> arasında çıkmıştır [26].



Şekil 5. 60 derecede kürlenene geopolimer harç numunelerin birim ağırlıkları



Şekil 6. 90 derecede kürlenene geopolimer harç numunelerin birim ağırlıkları

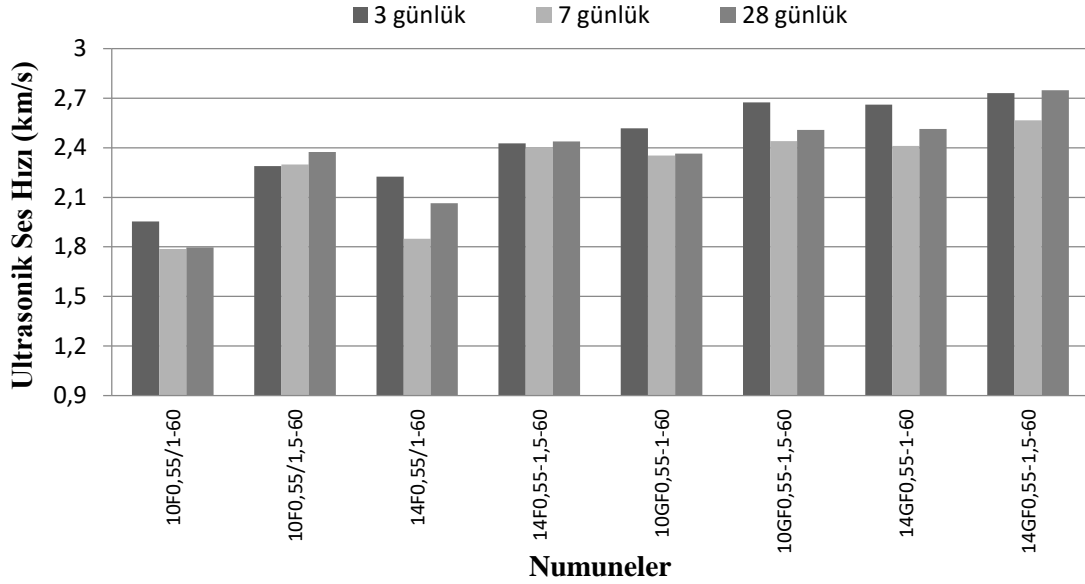
Numunelerin 60 °C ve 90 °C sıcaklıkta kürlenene numunelerin birim hacim ağırlığı birbirine çok yakın çıkmıştır. Sonuçlar değişken olduğundan, molarite ve SS/SH oranının sertleşmiş birim hacim ağırlık üzerindeki etkisine ilişkin bir çıkarım yapmak mümkün değildir.

### 3.2. Ultrasonik Ses Hızları

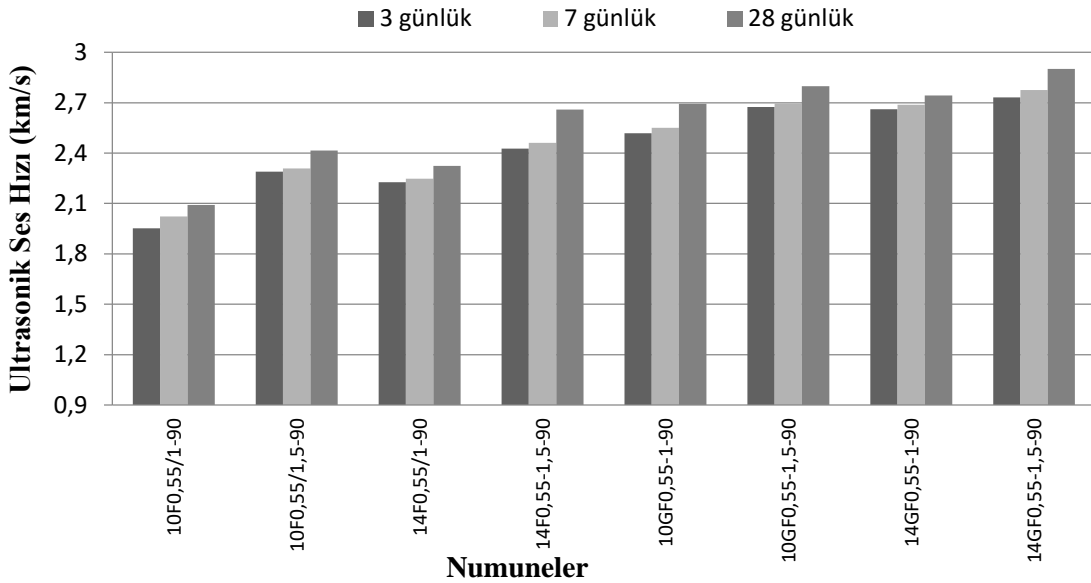
Geopolimer harç numunelerin ultrasonik ses hızı sonuçları Şekil 7 ve 8’de verilmiştir.

3, 7 ve 28 günlük 60 °C’de kürlenene geopolimer harç numunelerin ultrases hızları 1,773-2,749 km/s arasında değişmekte, en yüksek ses hızı değerini 14GF0,55-1,5 numunesi verirken en düşük ses hızı

değerini 10F0,55-1 numunesi vermiştir. 90 °C’de kürlenene geopolimer harç numunelerin ultrases hızları ise 1,953-2,901 km/s arasında ağırlığı değişmekte, en yüksek ses hızını 14GF0,55-1,5 numunesi ve en düşük ses hızını 10F0,55-1 numunesi vermektedir. Kaya’nın yapmış olduğu çalışmada geopolimer harç numunelerin ultrasonik ses hızları 2,065-2,882 km/s arasında değişmektedir [31].



Şekil 7. 60 derecede kürlenene geopolimer harç numunelerin ultrasonik ses hızları



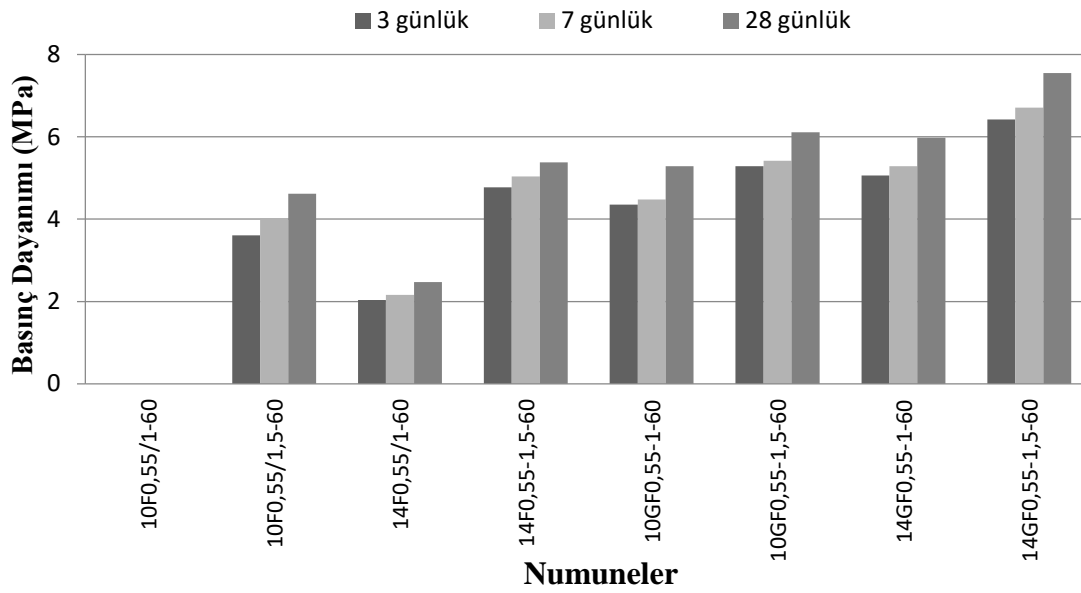
Şekil 8. 90 derecede kürlenene geopolimer harç numunelerin ultrasonik ses hızları

Geopolimer harçların molaritesi ve SS/SH oranı arttıkça ses hızı değerleri artmıştır. Bu durum basınç dayanımı kısmında açıklanacaktır. Ayrıca öğütülmüş uçucu külün kullanıldığı numunelerin ses hızı sonuçları öğütülmemiş uçucu küle oranla daha yüksek çıkmıştır. Assi vd. yapmış oldukları çalışmada, ortalama parçacık boyutu küçültüldüğünde geopolimer beton numunelerin daha yoğun hale geldiğini ve bu durumu boşlukların küçük uçucu kül partikülleri tarafından doldurulması ve/veya geopolimerizasyon ürünlerinin oluşmasıyla ilişkili olduğunu belirtmişlerdir [32]. Ses hızı sonuçlarının, yapının gözenek yapısı ve kompaktlığı ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğu bilinmektedir [33].

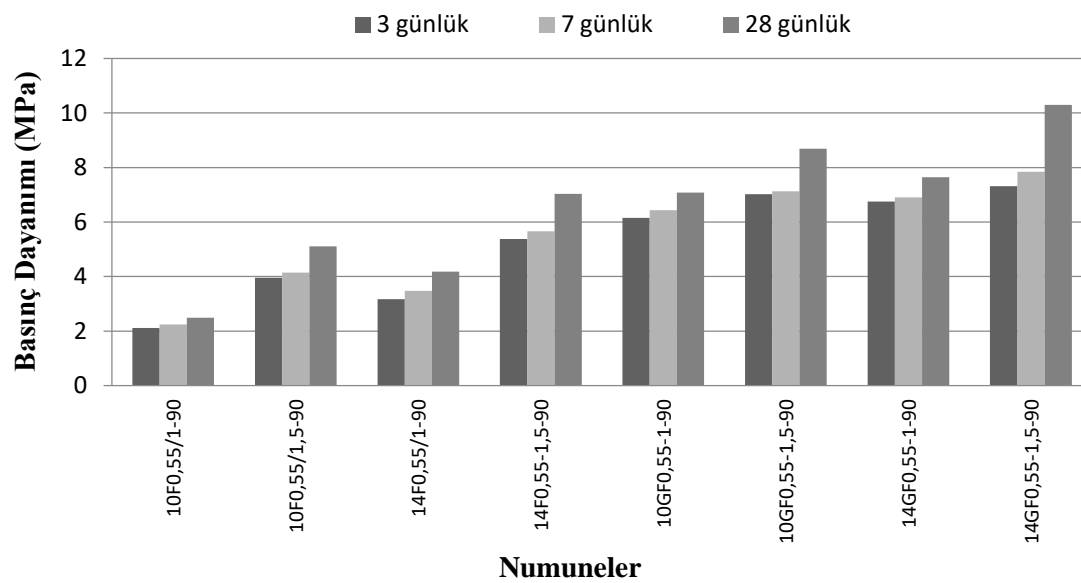


### 3.3. Basınç Dayanımları

Geopolimer harç numunelerin basınç dayanımları Şekil 9 ve 10'da verilmiştir. 28 günlük 60 °C'de kürlenmiş geopolimer harç numunelerin basınç dayanımları 0-7,55 MPa arasında değişmektedir. En yüksek basınç dayanımını 14GF0,55/1,5-60 numunesi verirken en düşük dayanım değeri 10F0,55/1-60 numunesinde çıkmıştır. 10F0,55/1-60 numunesi için basınç dayanım değeri elde edilmemiştir. Öğütme farklarının etkisi incelendiğinde; 3 günlük numunelerde sırasıyla yaklaşık %435, %47, %148 ve %135, 7 günlük numunelerde sırasıyla yaklaşık %448, %35, %145 ve %33 ve 28 günlük numunelerde sırasıyla yaklaşık %529, %32, %142 ve %40 oranlarda daha fazla basınç dayanımı elde edilmiştir. Ortalama parçacık boyutu küçülmesine bağlı olarak numuneler küçük ölçekli boşlukların dolmasıyla daha boşluksuz yapıya sahip olmakta ve ayrıca, geopolimerizasyon ürünlerinin oluşmasına bağlı olduğu vurgulanmıştır [32].



Şekil 9. 60 derecede kürlenmiş geopolimer harç numunelerin basınç dayanımları

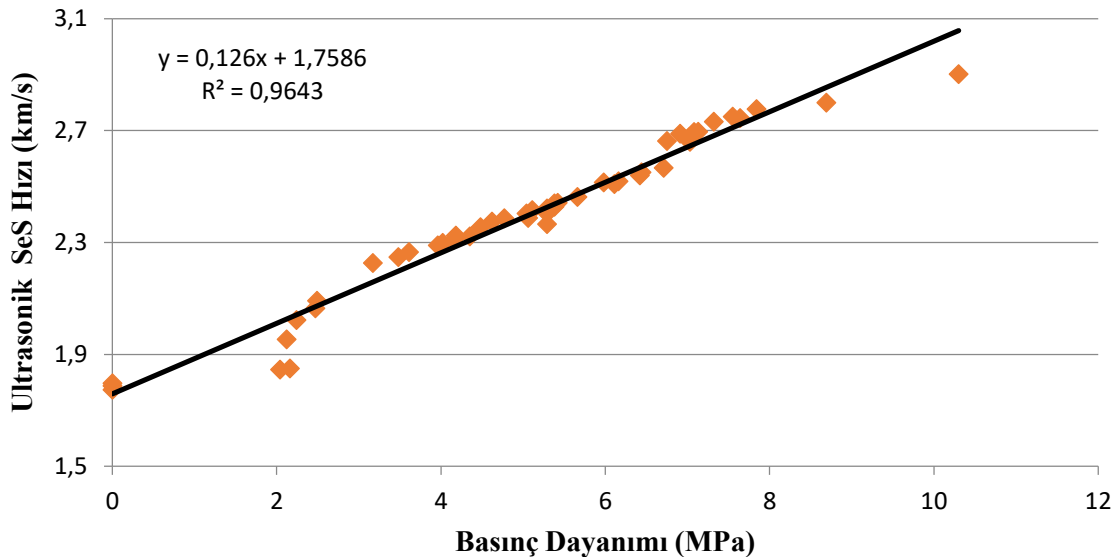


Şekil 10. 90 derecede kürlenmiş geopolimer harç numunelerin basınç dayanımları

Molarite farklarının etkisi incelendiğinde; 3 günlük numunelerde sırasıyla yaklaşık %204, %32, %16 ve %21 günlük numuneler arasında sırasıyla yaklaşık %216, %25, %18 ve %24 ve 28 günlük numunelerde sırasıyla yaklaşık %247, %16, %13 ve %24 oranlarda daha fazla basınç dayanım değerleri vermiştir. Bashar vd., 12 ve 14 M olmak üzere iki farklı NaOH konsantrasyonu kullanılmıştır. 14 M serisinin basınç dayanımı, 12 M’li karışımlardan daha yüksek basınç dayanım değerleri elde etmiştir. Daha düşük konsantrasyonların kullanımının daha zayıf reaksiyonlara neden olduğu bildirilmiştir. Daha yüksek basınç dayanımı, silika ve alüminanın yüksek molariteli alkali çözelti ile süzülmesiyle ilgilidir. Parçacıkların çözünme süreci ve bağlanması NaOH konsantrasyonu ile ilgilidir. Bu nedenle, yüksek konsantrasyonda NaOH çözeltilerinin kullanılması daha iyi bir çözünmeye yol açar ve geopolimerizasyon reaksiyonlarını artırır [34]. Bu ifade diğer araştırmacılar tarafından da desteklenmektedir [35-37].

SS/SH farklarının etkisi incelendiğinde; 3 günlük numunelerde sırasıyla yaklaşık %361, %134, %22 ve %27 günlük numuneler arasında sırasıyla yaklaşık %402, %133, %21 ve %27 ve 28 günlük numunelerde sırasıyla yaklaşık %462, %118, %16 ve %26 oranlarda daha fazla basınç dayanım değerleri vermiştir. Naghizadeh ve Ekolu’nun çalışmasında beş farklı SS/SH oranı (1,0, 1,5, 2,0, 2,5 ve 3,0) kullanılmıştır. Bu çalışmada, geopolimerlerin basınç dayanımı 1,5 SS/SH oranına kadar artmıştır [38]. Yapılan başka bir çalışmada, 1,5 SS/SH oranı, fırında kürlenme durumunda 1,0 SS/SH oranı ile üretilen geopolimerlerden daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Bu artışın geopolimerizasyon işlemi için gerekli olan karışımdaki silis miktarının artmasından kaynaklandığı bildirilmektedir [39].

28 günlük 90 °C’de kürlenmiş geopolimer harç numunelerin basınç dayanımları 2,49-10,30 MPa arasında değişmektedir. 60 derecede kürlenmiş 10F0,55/1-60 numunesinde basınç dayanımı elde edilemezken aynı numuneyi 90 derecede kürlendiğimizde 2,49 MPa basınç dayanım değeri bulunmuştur. 14GF0,55/1,5-90 numunesi 14GF0,55/1,5-60 numunesine oranla %36 oranında daha fazla basınç dayanım değeri vermiştir. Bu durum sıcaklık artışı ile geopolimerlerin daha fazla dayanımı kazandırdığını göstermektedir. Atiş vd. yaptıkları çalışmada, geopolimer harç numunelerine 45-115 °C sıcaklık kürü uygulamışlardır.



Şekil 11. Ultrasonik ses hızı sonuçları ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

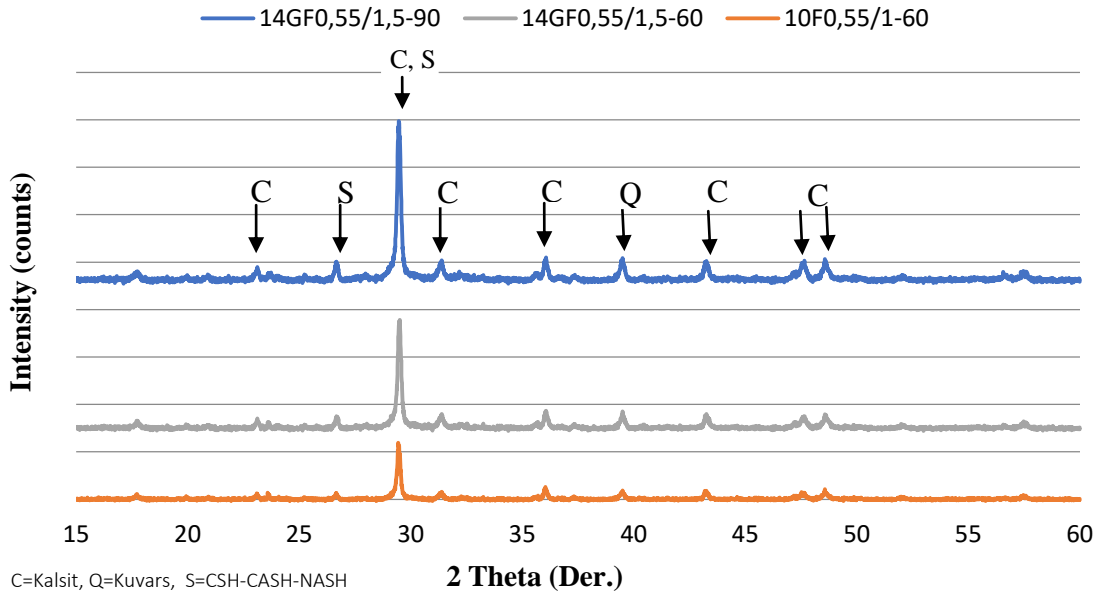
Geopolimer harç karışımında alkali aktivatör konsantrasyonu arttıkça, basınç dayanımının arttığını ve ısıyla kürlenme sıcaklığı Na konsantrasyonuna bağlı olan optimal bir noktaya kadar yükseldikçe basınç dayanımının arttığı belirtilmiştir. 120 MPa basınç dayanımı değerini % 14 NaOH, 115 °C’de

24 saat kür ile elde edilmiştir [40]. Ultrasonik ses hızı sonuçları ile basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 11’de verilmiştir.

Sonuçların tamamının birlikte değerlendirildiği doğrusal bir regresyon yönteminin kullanıldığı şekilden görülebilmektedir.  $R^2$  değeri 0,9643 çıkmış ve bu durum UPV ile basınç dayanımı arasında çok güçlü bir ilişki olduğu anlamına gelmektedir. Sevinç ve Durgun’un yaptıkları çalışmada geopolimer numunelerin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişkiyi belirlemişler ve bu değer  $R^2 = 0,9392$ ’dir [26]. Elde edilen  $R^2$  değeri belirtilen çalışmadaki bulgular ile uyum içindedir.

### 3.4. XRD ve TGA Analizleri

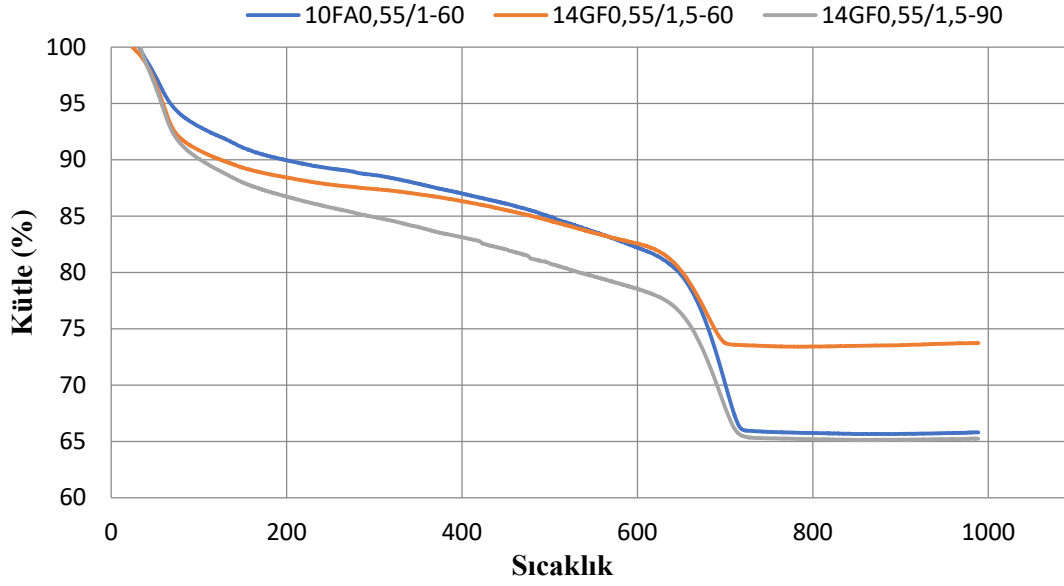
Geopolimer harç numunelerin XRD analizleri Şekil 12 ve TGA analizleri Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 12. Geopolimer harç numunelerin XRD analizleri

10F0,55/1-60 (0 MPa) geopolimer harç numunesinden basınç dayanımı elde edilememiştir. 60 derecede kür edilen geopolimer harç numuneleri arasında en yüksek basınç dayanımı veren 14GF0,55/1,5-60 (7,55 MPa) olmuş ve 90 derecede ise 14GF0,55/1,5-90 (10,3 MPa) en yüksek basınç değeri vermiştir. XRD analizleri incelendiğinde numunelerin basınç dayanım değerlerinin artmasına bağlı olarak 29,4° de (2θ) oluşan pikin belirgin şekilde arttığı Şekil 12’de görülmektedir. Kalsiyum silikat hidrat (CSH), kalsiyum alüminat silikat hidrat (CASH) ve sodyum alüminat silikat hidrat (NASH), geopolimer dayanım kazanırken beklenen olası fazlardır [15,41]. XRD analizlerinde CSH, CASH ve NASH jel fazlarının varlığı, genellikle CSH, CASH fazları için geopolimer faz için 28-30° (2θ) civarında geniş bir pik ve yaklaşık olarak 30° (2θ) civarında oluşan temel pik ile ilişkilidir [15,41-43]. Chindapasirt vd. yaptıkları çalışmada geopolimer fazın oluşumu, 28° (2θ) civarında geniş pikin varlığı ile güçlü bir şekilde belirgin olduğu ve CSH fazının varlığı, 29,35° ve 32,05° (2θ) piklerin varlığı ile doğruladıklarını belirtmişlerdir [15].

10F0,55/1-60 numunesinin 200 °C’de kütle kaybı %10,033 iken, 14GF0,55/1,5-60 numunesinde %11,574 ve 14GF0,55/1,5-90 numunesinde ise %13,264 olmuştur. Genellikle, geopolimerler için en önemli kütle kaybı 25 ile 200 °C arasında oluşmakta, bu da hem serbest suyun hem de kimyasal olarak bağlanmış suyun bir kısmının numuneden buharlaşmasından kaynaklanmaktadır [44]. Geopolimerler fiziksel su, kimyasal su ve hidroksil içermektedir. Bu su türleri farklı bir sıcaklık aralığında buharlaşır; fiziksel su ve kimyasal su sırasıyla 20-100 °C ve 100-300 °C’de buharlaşırken, hidroksil grupları 300 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda buharlaşmaktadır [45].



Şekil 13. Geopolimer harç numunelerin TGA analizleri

10F0,55/1-60 numunesinin 650 °C’de kütle kaybı %20,23 iken, 14GF0,55/1,5-60 numunesinde %19,85 ve 14GF0,55/1,5-90 numunesinde ise %23,63 olmuştur. 300-650 °C’de gözlemlenen ikinci önemli kütle kaybı, Si-OH, Al-OH ve Ca-OH gruplarının dehidroksilasyonuna karşılık gelmektedir. Son aşamada kaynaklanan kütle kaybı genellikle 750 °C’nin üzerinde görülür ve karbonat türlerinin ayrışmasından oluşmaktadır [44,46-47]. Numunelerin 1000 °C’deki toplam kütle kayıpları; 10F0,55/1-60 numunesi için %65,81, 14GF0,55/1,5-60 numunesi için %73,73 ve 14GF0,55/1,5-90 numunesi için %65,24 oranlarında meydana gelmiştir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, yüksek kalsiyumlu Afşin-Elbistan uçucu külünün öğütülmüş ve öğütülmemiş halde geopolimer hammaddesi olarak değerlendirilebilirliği araştırılmıştır. Üretilen harç numunelerine fiziksel, mekanik ve içyapı analizlerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneylere ve sonuçlarına göre aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

- Genel olarak, öğütülmüş uçucu kül kullanımı, geopolimer numunelerin taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlıklarını biraz arttırmıştır. Bu durum öğütme parametresine bağlı olarak külün özgül ağırlığının artışı ile açıklanabilir.
- Ultrasonik ses hızları incelendiğinde; öğütülmüş kül kullanımı, molarite, SS/SH oranı ve kür sıcaklığı artması ile geopolimer harç numuneler daha boşluksuz yapı oluşmuş ve ses değerleri artmıştır.
- Öğütülmüş uçucu kül kullanılan numunelerde, öğütülmemiş uçucu kül katkılı numunelere oranla %47 ile %184 oranla daha fazla basınç dayanımları elde edilmiştir. Molarite, SS/SH oranı ve kür sıcaklığı artması da basınç dayanımını artırmıştır.
- Basınç dayanımlarındaki artışlar XRD ve TGA analizleri ile desteklenmiştir. Çok az oranda çimento yerine kullanılabilen Afşin-Elbistan uçucu külünü geopolimer harçlarda %100 kullanımı sağlanmış ve bu çalışmada basınç dayanımı 10,3 MPa elde edilmiştir.

#### Yazar(lar)ın Katkıları

AHS çalışmalarını yaptı ve makaleyi yazdı. Yazar makalenin son halini okudu ve onayladı.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## Kaynaklar

- [1]. Kantarcı, F., Türkmen, İ., Ekinci, E., “Optimization of Production Parameters of Geopolymer Mortar and Concrete: A Comprehensive Experimental Study”, *Construction and Building Materials*, 2019, 228; 116770.
- [2]. Yaşar, B.A., Köse, M.M., Avgın, S., Temiz, H., “Düşük Dayanımlı Betonların Elastisite Modülünün Bulunması”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2020, 7 (3); 1384-1397.
- [3]. Saka, R.C., Gökdemir, A., Subaşı, S., “Sepiyolit İkameli Çimentolu Karışımların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi* 2018, 5(2); 681-692.
- [4]. Özdemir, İ., Koçak, Y., “Pirinç Kabuğu Külü İkameli Çimentoların Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi* 2020, 7(1); 160-168.
- [5]. Toniolo, N., Boccaccini, A. R., “Fly Ash-Based Geopolymers Containing Added Silicate Waste. A Review”, *Ceramics International*, 2017, 43(17); 14545–14551.
- [6]. Topçu, İ. B., Sofuoğlu, T., “Pres Filtre Atığı ve Uçucu Kül ile Elde Edilen Geopolimer Harçların Farklı Koşullar Altında Birim Ağırlığı ve Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi* 2020, 7 (2); 806-823.
- [7]. Liew, K. M., Sojobi, A. O., Zhang, L. W., “Green Concrete: Prospects and Challenges”, *Construction and Building Materials*, 2017, 156; 1063–1095.
- [8]. Meesala, C. R., Verma, N. K., Kumar, S., “Critical Review On Fly-Ash Based Geopolymer Concrete”, *Structural Concrete*, 2019, 1–16.
- [9]. Chindapasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V., “Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer”, *Cement and Concrete Composites*, 2017, 29(3); 224–229.
- [10]. Davidovits, J., “Geopolymer Chemistry and Application”, 2nd Ed., Institute Geopolymer, Saint-Quentin, France, 585s, 2008.
- [11]. Khale D., Chaudhary R., “Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing its Development: A Review”, *Journal of Materials Science*, 2007, 42; 729–746.
- [12]. Chindapasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S., Cao, T., “High-Strength Geopolymer Using Fine High-Calcium Fly Ash”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(3); 264–270.
- [13]. Siddique, R., “Performance Characteristics of High-Volume Class F Fly Ash Concrete”, *Cement and Concrete Research*, 2004, 34; 487–493.
- [14]. Siddique, R., Khatib, J.M., “Abrasion Resistance and Mechanical Properties of High-Volume Fly Ash Concrete”, *Materials and Structures*, 2010; 43; 709–718.
- [15]. Chindapasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., Hanjitsuwan, S., “Effect of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the Setting and Hardening of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Systems”, *Journal of Materials Science*, 2012, 47(12); 4876–4883.
- [16]. Peker, S.N., “Lignite-fired Thermal Power Plants and SO<sub>2</sub> Pollution in Turkey”, *Energy Policy*, 2006, 34; 2690–2701.
- [17]. Mahyar, M., Erdoğan, S.T., “Phosphate-activated High-Calcium Fly Ash Acid-Base Cements, Cement Concrete Composite”, 2015, 96–103.
- [18]. Türker, P., Erdoğan, B., Kantaş, F., Yeğınobalı, A., “Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, 112s. 2009.
- [19]. ASTM C618-17a, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [20]. EN 197-1, Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2011.
- [21]. EN 450-1, Fly ash for concrete- Part 1: Definition, specification and conformity criteria, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2012.

- [22]. Demir Şahin, D, Çullu, M, Eker, H., “Betonların Aşındırma ve Karbonatlaşma Performanslarına Kireçsi Uçucu Küllerin Farklı İncelik ve İkame Oranlarının Etkisi”, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2019, 17; 1150-1163.
- [23]. Binici, H., Görür, E. B., Durgun, M. Y., “Afşin-Elbistan Uçucu Külü ve Tekstil Fabrikaları Atık Küllerinin Betonda Puzolanik Katkı Olarak Kullanılması”, KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2009, 12(1); 10-19.
- [24]. Atış, C , Karahan, O , Bilim, C , Özcan, F , Sevim, U., “Sodyum Sülfat İle Aktifleştirilen Uçucu Kül Katkılı Harçların Özellikleri”, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2016, 5(2); 117-123.
- [25]. Top, S., Vapur, H., “Artık Malzemelerden Box Behnken Test Dizaynı Kullanılarak Hafif Geopolimer Beton Üretimi”, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 2020, 11(2); 689-700.
- [26]. Sevinç, A. H., Durgun, M. Y., “Properties of High-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concretes Improved with High-Silica Sources”, Construction and Building Materials, 2020, 261; 120014.
- [27]. TS EN 1008, Beton Karma Suyu- Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
- [28]. Rangan, B.V., “Design and Manufacture of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete”, Concrete Australia, 2008, 34 (2); 37–43.
- [29]. ASTM C 597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [30]. TS EN 12390-3, Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Ankara, 2010.
- [31]. Kaya, M., “Yüksek ve Düşük Kalsiyum İçeren Uçucu Küller ile Üretilen Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Türk Doğa ve Fen Dergisi, 2020, 9(2); 96-104
- [32]. Assi, L. N., Eddie Deaver, E., & Ziehl, P., ”Effect of Source And Particle Size Distribution on The Mechanical and Microstructural Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete”, Construction and Building Materials, 2018, 167(2); 372–380.
- [33]. Benaicha, M., Jalbaud, O., Alaoui, A. H., Burtschell, Y., “Correlation Between the Mechanical Behavior and The Ultrasonic Velocity of Fiber-Reinforced Concrete”, Construction and Building Materials, 2015, 101; 702–709.
- [34]. Ibnul Bashar, I., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Islam, A., “The Effect of Variation of Molarity of Alkali Activator and Fine Aggregate Content on the Compressive Strength of The Fly Ash: Palm Oil Fuel Ash Based Geopolymer Mortar”, Advances in Materials Science and Engineering, 2014, 245473; 1–13.
- [35]. Kovalchuk, G., Fernandez-Jimenez, A., Palomo A., “Alkali Activated Fly Ash: Effect of Thermal Curing Conditions on Mechanical and Microstructural Development – Part II”, Fuel, 2007, 83(3), 315–322.
- [36]. Hardjito, D., Cheak, C. C., & Lee Ing, C. H., “Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash-based Geopolymer Mortar”, Modern Applied Science, 2008, 2(4); 3–11.
- [37]. Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., Chindapasirt, P., “Naoh-Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured At Ambient Temperature”, Fuel, 2011, 90(6); 2118–2124.
- [38]. Naghizadeh, A., Ekolu, S.O., Effect of Mix Parameters on Strength of Geopolymer Mortars – Experimental Study, Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures, Leeds, UK, 2018, 315–320.
- [39]. Gomaa, E., Sargon, S., Kashosi, C., El Gawady, M., Fresh Properties and Early Compressive Strength of Alkali-Activated High Calcium Fly Ash Paste. Proceedings of the 4th Congres

- International de Geotechnique – Ouvrages – Structures, Lecture Notes in Civil Engineering, 2018, 8, 497–507.
- [40]. Atış, C. D., Görür, E. B., Karahan, O., Bilim, C., İlkentapar, S., Luga, E., “Very High Strength (120 MPa) Class F Fly Ash Geopolymer Mortar Activated At Different Naoh Amount, Heat Curing Temperature And Heat Curing Duration”, *Construction and Building Materials*, 2015, 96; 673–678.
- [41]. Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A., Macphee, D. E., “Compatibility Studies Between N-A-S-H and C-A-S-H Gels: Study in The Ternary Diagram  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ”, *Cement and Concrete Research*, 2011,41(9); 923-931.
- [42]. Lecomte, I., Henrist, C., Liégeois, M., Maseri, F., Rulmont, A., Cloots, R., “(Micro)-Structural Comparison between Geopolymers, Alkali-Activated Slag Cement And Portland Cement”, *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, 26(16); 3789–3797.
- [43]. Pardal, X., Pochard, I., Nonat, A., “Experimental Study of Si–Al Substitution in Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) Prepared Under Equilibrium Conditions”, *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(8); 637–643.
- [44]. He, R., Dai, N., Wang, Z., “Thermal and Mechanical Properties of Geopolymers Exposed to High Temperature: A Literature Review”, *Advances in Civil Engineering*, 2020; 1–17.
- [45]. Duxson, P., Lukey, G. C., van Deventer, J. S. J., “Physical Evolution of Na-Geopolymer Derived From Metakaolin up to 1000°C” , *Journal of Materials Science*, 2007, 42(9); 3044–3054.
- [46]. Nath, S. K., Kumar, S., “Role of Particle Fineness on Engineering Properties and Microstructure of Fly Ash Derived Geopolymer”, *Construction and Building Materials*, 2020, 233; 117294.
- [47]. Rakhimova, N. R., Rakhimov, R. Z., Morozov, V. P., Gaifullin, A. R., Potapova, L. I., Gubaidullina, A. M., Osin, Y. N., “Marl-based Geopolymers Incorporated with Limestone: A Feasibility Study”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2018, 492; 1–10.